多鳞鱚对饲料中 n-3 高不饱和脂肪酸需要量的研究

何昊伦[1,2]　董晓慧[1,2*]　谭北平[1,2]　杨奇慧[1,2]　迟淑艳[1,2]　刘泓宇[1,2]　章　双[1,2]　杨原志[1,2]　张海涛[2]

（1.广东海洋大学水产学院，水产动物营养与饲料实验室，湛江 524088；2.农业部华南水产与畜禽饲料重点实验室，湛江 524000）

摘　要：本试验旨在研究多鳞鱚对饲料中 n-3 高不饱和脂肪酸（HUFA）的需要量。挑选均重为(6.0±0.6) g 的多鳞鱚幼鱼 540 尾，随机分为 6 组，每组 3 个重复，每个重复 30 尾鱼。各组分别投喂 n-3HUFA 水平为 0.53%、0.80%、1.22%、1.62%、2.12%和 2.56%的等氮等脂饲料 8 周。结果表明：1）2.12%组的增重率和特定生长率最高，显著高于 0.53%组（$P<0.05$）；2.12%组的饲料系数最低，显著低于 0.53%组（$P<0.05$）；2.12%组的肝体比最低，显著低于 0.53%组和 0.80%组（$P<0.05$）；2.12%组的肥满度最高，显著高于除 1.62%组外的其他各组（$P<0.05$）。2）各组之间的全鱼水分、粗蛋白质、粗灰分含量无显著差异（$P>0.05$）；1.62%组的全鱼粗脂肪含量最高，显著高于除 1.62%组外的其他各组（$P<0.05$）。3）2.56%组的血清高密度脂蛋白胆固醇（HDL-C）含量显著高于除 2.12%组外的其他各试验组（$P<0.05$），0.80%组的血清低密度脂蛋白胆固醇（LDL-C）含量显著高于其他各组（$P<0.05$），1.22%组的血清谷丙转氨酶（ALT）活性显著低于其他各组（$P<0.05$），0.80%组的血清谷草转氨酶（AST）活性显著低于其他各组（$P<0.05$）；0.53%组的血清总胆固醇（T-CHOL）、甘油三酯（TG）含量显著低于其他各组（$P<0.05$），0.80%组的血清 CHOL、TG 含量显著高于其他各组（$P<0.05$）。4）各组之间的血清超氧化物歧化酶（SOD）和酸性磷酸酶（ACP）活性无显著差异（$P>0.05$），2.12%组和 2.56%组的血清碱性磷酸酶（AKP）活性显著低于除 1.62%组外的其他各组（$P<0.05$），1.62%组的血清过氧化氢酶（CAT）活性显著低于除 1.22%组和 2.12%组外的其他各组（$P<0.05$）。5）随着饲料 n-3HUFA 水平的提高，肝脏 C18:3n-3、C20:5n-3、C22:6n-3 含量显著升高（$P<0.05$），肝脏 C18:2n-6 含量显著降低（$P<0.05$）。6）随着饲料 n-3HUFA 水平的提高，肌肉 C18:2n-6、C20:4n-6 含量呈降低趋势，2.12%组和 2.56 组显著低于其他各组（$P<0.05$）；肌肉 C20:5n-3、C22:6n-3 含量呈升高趋势，2.56%

收稿日期：2018-04-23
基金项目：渔港建设和渔业产业发展专项（A201608C06）；湛江市财政资金科技专项竞争性分配项目（2016A3022）；广东省省级科技计划项目（2015A020209170）；现代农业产业技术体系专项资金资助（CARS-47）
作者简介：何昊伦（1993-），男，广东深圳人，硕士研究生，研究方向为水产动物营养与饲料。E-mail： 649410292@qq.com
*通信作者：董晓慧，教授，博士生导师，E-mail： dongxiaohui2003@163.com

组显著高于其他各组（$P<0.05$）。由此可见，以增重率为依据，折线模型拟合得出多鳞鱚幼鱼对饲料中n-3HUFA的需要量为2.21%。

关键词：多鳞鱚；n-3高不饱和脂肪酸；生长性能；血清生化指标；组织脂肪酸含量

中图分类号：S963　　　　文献标识码：　　　　文章编号：

多鳞鱚（*Sillago sihama*）属于鲈形目（Perciformes）、鲈亚目（Percoidei)、鱚科（Sillaginidae）、鱚属（*Sillago*），俗称沙钻、船丁鱼、麦穗，广东又名沙锥鱼。多鳞鱚主要分布于印度洋和西太平洋的热带海域，在我国渤海、南海等沿海均有分布，粤西地区产量较高。多鳞鱚为小型肉食性鱼类，味道鲜美，是具有较高经济价值和营养价值的食用鱼类，深受消费者的喜爱，曾在我国近海捕捞作业中占有相当重要的位置。但由于近年来的过度捕捞，野生个体数目减少，群体低龄化，自然资源已面临枯竭[1]。

高不饱和脂肪酸（highly unsaturated fatty acids，HUFAs）是指碳原子数目≥20且双键数目≥3的一类不饱和脂肪酸。根据甲基端第1个双键所连碳原子的位置，可将高不饱和脂肪酸分为n-3、n-6等系列，其中n-3HUFA主要包括二十碳五烯酸（EPA）、二十二碳六烯酸（DHA）。n-3HUFA的生理功能主要包括：抑制促炎症因子产生，抑制炎症反应，减轻疾病症状；视网膜的重要结构成分，对视力发育有促进作用；作为细胞膜的重要组成成分，可影响甚至决定细胞膜的功能，同时可影响细胞膜的流动性，对细胞之间的信号传递起到重大的作用等[2-4]。在海水鱼中，EPA、DHA是类花生酸等高活性旁分泌激素类的前体[5]，参与生理功能的调控。已有的报道证明，多数淡水鱼具有合成EPA和DHA的能力，饲料中只需补充其合成原料亚麻酸即可满足其对n-3HUFA的需要[6]。对于缺乏脂肪酸延长和去饱和能力的海水鱼而言，n-3HUFA则是其必需脂肪酸[6]。饲料中添加n-3HUFA能提高海水鱼的生长性能，有利于脂类代谢平衡，加强机体免疫功能[7-10]。

多鳞鱚自2012年繁育技术得以突破后[11]，其养殖面积在粤西地区快速增加，但作为一种新兴的养殖鱼类，该鱼的营养与饲料学研究尚未见报道，严重制约了多鳞鱚的规模化养殖。因此，本试验旨在研究饲料n-3HUFA水平对多鳞鱚生长性能、形态学指标、体成分、血清生化指标、相关酶活性及组织脂肪酸含量的影响，通过对相关指标的评价，确定多鳞鱚幼鱼对饲料中n-3HUFA的适宜需要量，为多鳞鱚高效配

合饲料的研发提供基础数据。

1　材料与方法

1.1　试验设计与饲料配制

以鱼粉、小麦谷朊粉等为蛋白质源，鱼油和玉米油为脂肪源，调整饲料中玉米油和鱼油的含量，配制 n-3HUFA 水平分别为 0.53%、0.80%、1.22%、1.62%、2.12%和 2.56%的 6 组等氮等能饲料，试验饲料组成及营养水平见表 1，试验饲料脂肪酸组成见表 2。饲料原料粉碎后过 60 目筛，根据饲料配方称取各原料。饲料制作过程中，微量成分采用逐级扩大法混合均匀，再添加不同含量的鱼油和玉米油并搅拌均匀，然后添加 30%~40%的水制成团状，用双螺杆挤条机制成粒径为 1.5 mm 的饲料，在阴凉干燥环境中风干后封口带密封，-20 ℃保存。

表 1　试验饲料组成及营养水平（风干基础）

Table 1　Composition and nutrient levels of experimental diets (air-dry basis)　%

项目 Items	n-3HUFA 水平 n-3HUFA level/%					
	0.53	0.80	1.22	1.62	2.12	2.56
原料 Ingredients						
鱼粉 Fish meal	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
谷朊粉 Wheat gluten	7.05	7.05	7.05	7.05	7.05	7.05
去皮豆粕 Peeled soybean meal	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
玉米蛋白粉 Corn protein powder	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00
鱼油 Fish oil		1.20	2.40	3.60	4.80	6.00
玉米油 Corn oil	6.00	4.80	3.60	2.40	1.20	
面粉 Wheat flour	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00
维生素预混料 Vitamin premix1)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
矿物质预混料 Mineral premix2)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

氯化胆碱 Choline chloride	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
维生素 C Vitamin C	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
磷酸二氢钙 $Ca(H_2PO_4)_2$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
诱食剂 Attractant	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
乙氧基喹啉 Ethoxy quinolone	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
微晶纤维素 Microcrystalline cellulose	7.57	7.57	7.57	7.57	7.57	7.57
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels						
水分 Moisture	8.45	8.14	8.25	8.86	8.11	8.44
粗蛋白质 CP	46.41	46.09	47.19	46.44	46.93	47.22
粗脂肪 EE	9.44	9.67	9.32	9.22	9.77	9.71
粗灰分 Ash	7.97	7.60	7.61	7.61	7.56	7.52
总磷 TP	1.21	1.19	1.16	1.22	1.24	1.17

1)维生素预混料为每千克饲料提供 The vitamin premix provided the following per kg of the diet：VA 22 500 IU，VD_3 6 000 IU，VE 200 mg，VK_3 40 mg，VB_1 30 mg，VB_2 45 mg，VB_6 35 mg，VB_{12} 0.25 mg，泛酸钙 calcium pantothenate 150 mg，烟酸 nicotinic acid 225 mg，叶酸 folic acid 12.5 g，生物素 biotin 0. 5 mg，肌醇 inositol 500 mg。

2)矿物质预混料为每千克饲料提供 The mineral premix provided the following per kg of the diet：Fe 60 mg，Zn 24 mg，Mn 16 mg，Cu 1.4 mg，Co 0.2 mg，Se 0.1 mg，I 0.2 mg。

表 2 试验饲料脂肪酸组成（%总脂肪酸）

Table 2 Fatty acid composition in experiment diets （%TFA）

脂肪酸	n-3HUFA 水平 n-3HUFA level/%					
Fatty acids	0.53	0.80	1.22	1.62	2.12	2.56

C14:0	1.26	1.39	1.55	1.74	1.93	2.12
C16:0	15.00	15.59	16.54	17.57	18.52	19.70
C16:1n-9	1.69	2.29	3.15	4.02	5.10	6.00
C18:0	2.56	2.90	3.42	3.92	4.52	5.16
C18:1n-9	25.69	24.79	23.43	21.96	20.32	18.73
C18:2n-6	44.28	39.89	33.22	26.57	19.78	11.49
C18:3n-3	1.20	1.26	1.35	1.48	1.63	1.92
C20:0	0.46	0.49	0.53	0.56	0.60	0.63
C20:1n-6	0.52	0.62	0.78	0.96	1.14	1.34
C20:2n-6	0.07	0.09	0.11	0.13	0.16	0.05
C20:3n-6	0.04	0.06	0.09	0.12	0.14	0.19
C22:0	0.19	0.19	0.54	0.21	0.21	0.23
C20:5n-3	3.73	5.59	8.29	10.95	14.34	17.15
C22:6n-3	2.15	3.34	5.24	7.09	9.24	11.28
n-3HUFA	5.88	8.93	13.53	18.04	23.58	28.43

1.2　试验动物与饲养管理

养殖试验在湛江市东海岛广东海洋大学海洋生物研究基地进行。试验所用的多鳞鱚鱼苗购自湛江市龙海天育苗实验基地，为当年越冬苗。

试验前多鳞鱚于 4.5 m×4.9 m×1.8 m 的室外水泥池中暂养至试验规格。正式试验开始时，多鳞鱚禁食 24 h 后分组。根据试验设计，挑选体格健壮、大小均一、均重为(6.0±0.6) g 的 540 尾鱼，随机分为 6 组，每组 3 个重复，每重复 1 个 0.5 m^3玻璃钢桶，每桶放 30 尾鱼。每天投喂 2 次（08:00 和 17:00），以肉眼观察达到饱食为止。有死亡时，记数并称重，然后解剖分析原因。定期监测水质。养殖试验于 6 月开始，养殖系统为聚乙烯玻璃钢桶，循环海水养殖，试验期间，水温 23~26 ℃，不间断充氧，溶氧浓度 5~6 mg/L，

水体盐度 26~28，养殖期 8 周。

1.3 样本采集及分析

1.3.1 样品采集

养殖试验结束禁食 24 h 后取样。每桶鱼用丁香酚麻醉后称重，计数，计算生长指标。每桶随机选 5 尾鱼量取体长、称体重、肝脏重，计算形态学指标。再取 5 尾鱼，吸干体表水分，编号于-20 ℃冰箱中保存，备测常规成分。另取 10 尾鱼心脏采血，血液置于 1.5 mL 离心管中于-20 ℃冰箱过夜后 4 000 r/min 离心 10 min，取上清液置于-80 ℃备用，待测血清生化指标。剖取肝脏及肌肉，液氮冷存，然后转移至-80 ℃冰箱，备测肝脏酶活性及肝脏和肌肉脂肪酸含量。

1.3.2 常规成分分析

全鱼和饲料常规成分采用国际标准方法[12]进行分析。样品在 105 ℃下烘干测定水分含量，凯氏定氮仪（Kjeltec^{TM} 8400，瑞典）测定样品中粗蛋白质含量，索氏抽提法（抽提剂为石油醚）测定样品中粗脂肪含量，550 ℃马弗炉灼烧法测定样品中粗灰分含量。

1.3.3 脂肪酸含量分析测定

根据 GB/T 21514—2008 进行脂肪酸含量的测定，原理为用氢氧化钠-甲醇溶液皂化，皂化物与三氟化硼-甲醇溶液反应生成脂肪酸甲酯。用毛细管气相色谱分离，色谱峰用已知组成的标准品进行鉴定，以内标法定量。

1.3.4 血清生化指标测定

使用全自动生化分析仪（日立 7600-110 型）测定血清中甘油三酯（TG）、高密度脂蛋白胆固醇（HDL-C）、低密度脂蛋白胆固醇（LDL-C）、总胆固醇（T-CHOL）含量及谷丙转氨酶（ALT）、谷草转氨酶（AST）活性，所需试剂盒均购自南京威特曼生物科技有限公司。

1.3.5 组织酶活性测定

肝脏中的过氧化氢酶（CAT）、超氧化物歧化酶（SOD）、碱性磷酸酶（AKP）、酸性磷酸酶（ACP）活性均使用南京建成生物工程研究所提供的试剂盒测定，测定步骤按试剂盒说明书进行。

1.4 生长指标和形态学指标计算公式

增重率（weight gain rate, WGR, %）=[（末均重-初均重）/初均重]×100；

特定生长率（specific growth rate, SGR, %/d）=[（ln 末均重-ln 初均重）/饲养天数]×100；

饲料系数（feed conversion rate, FCR）=摄食饲料干重/（末均重-初均重）；

成活率（survival rate, SR, %）=试验结束时鱼尾数/试验开始时鱼尾数；

肝体比（hepatosomatic index, HSI, %）=(肝脏重量/鱼体重)×100；

肥满度（condition factor, CF, g/cm^3）=[末重（g）/体长^3（cm）]×100。

1.5 数据统计

试验数据用平均值±标准差表示，采用 SPSS 20.0 对试验数据进行单因素方差分析（one-way ANOVA），若有显著性差异则进行 Duncan 氏法多重比较，P< 0.05 表示差异显著。

2 结 果

2.1 饲料 n-3HUFA 水平对多鳞鱚生长性能和形态学指标的影响

由表 3 可见，WGR 随着饲料 n-3HUFA 水平增加呈现先上升后下降趋势，2.12%组最高，显著高于 0.53%组和 0.80%组（P<0.05），与其他各组差异不显著（P>0.05）。SGR 随着饲料 n-3HUFA 水平增加呈现先上升后下降的趋势，2.12%组最高，显著高于 0.53%组和 2.56%组（P<0.05），与其他各组差异不显著（P>0.05）。FCR 随着 n-3HUFA 水平的增加呈现先下降后上升的趋势，2.12%组最低，显著低于 0.53%组（P<0.05），与其他各组差异不显著（P>0.05）。各组之间 SR 没有显著差异（P>0.05）。随着饲料 n-3HUFA 水平的增加，HSI 呈现出先下降后稳定的趋势，在 2.12%组达到最低值，显著低于 0.53%组和 0.80%组（P<0.05），与其他各组无显著差异（P>0.05）；而 CF 则呈现出先上升后下降的趋势，在 2.12%组达到最大值，显著高于除 1.62%组外的其他各组（P<0.05）。

表 3 饲料 n-3HUFA 水平对多鳞鱚生长性能和形态学指标的影响

Table 3 Effects of dietary n-3HUFA level on growth performance and morphological indicators of *Sillago sihama*

项目 Items	n-3HUFA 水平 n-3HUFA level/%					
	0.53	0.80	1.22	1.62	2.12	2.56
增重率 WGR/%	112.13±37.40[b]	115.83±41.33[b]	122.45±34.63[ab]	127.34±17.91[ab]	165.33±19.16[a]	129.57±31.39[ab]
特定生长率 SGR/(%/d)	1.29±0.09[c]	1.55±0.12[ab]	1.59±0.02[ab]	1.60±0.04[ab]	1.65±0.00[a]	1.43±0.13[bc]
饲料系数 FCR	1.96±0.05[a]	1.88±0.06[ab]	1.76±0.09[ab]	1.70±0.03[b]	1.67±0.08[b]	1.86±0.17[ab]
存活率 SR/%	84.44±1.92	85.00±2.36	85.56±3.85	85.00±2.36	85.00±7.07	84.44±1.92
肝体比 HSI/%	1.40±0.11[a]	1.17±0.26[ab]	0.96±0.06[bc]	1.00±0.06[bc]	0.84±0.08[c]	0.87±0.08[c]
肥满度 CF/(g/cm^3)	0.91±0.01[d]	0.96±0.00[bc]	0.96±0.03[bc]	0.99±0.03[ab]	1.01±0.03[a]	0.95±0.01[c]

同行数据肩标不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。下表同。

In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference (P<0.05). The same as below.

由图 1 可见，以 WGR 为依据，折线模型得出多鳞鱚对饲料中 n-3HUFA 的适宜需要量为 2.21%。

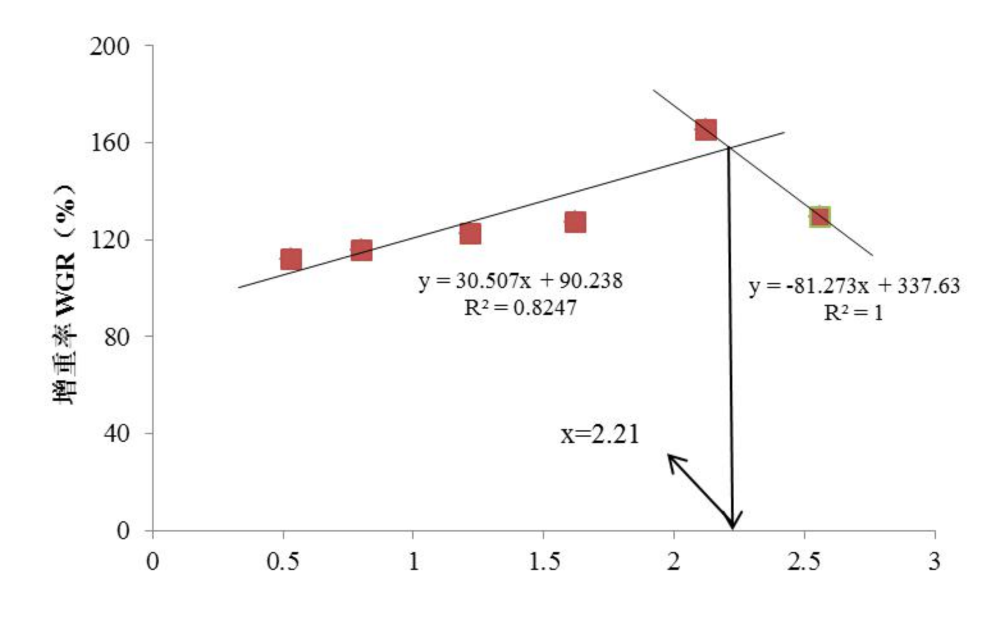


图 1 饲料 n-3HUFA 水平与多鳞鱚 WGR 的折线模型

Fig1 Broken-line relation of dietary n-3HUFA level and WGR of *Sillago sihama*

2.2 饲料 n-3HUFA 水平对多鳞鱚体成分的影响

由表 4 可见，各组之间全鱼水分、粗蛋白质、粗灰分含量无显著差异（$P>0.05$）。随着饲料 n-3HUFA 水平的增加，全鱼粗脂肪含量呈现先上升后下降的趋势，1.62%组和 2.12%组之间全鱼粗脂肪含量无显著差异（$P>0.05$），但显著高于其他各组（$P<0.05$），其他各组之间无显著差异（$P>0.05$）。

表 4　饲料 n-3HUFA 水平对多鳞鱚体成分的影响

Table 4　Effects of dietary n-3HUFA level on body composition of *Sillago sihama*　　%

项目 Items	n-3HUFA 水平 n-3HUFA level/%					
	0.53	0.80	1.22	1.62	2.12	2.56
水分 Moisture	53.50±2.12	57.50±4.95	53.33±2.31	58.50±0.71	58.50±0.71	54.00±1.11
粗蛋白质 CP	69.41±1.21	68.40±2.95	69.96±1.42	67.56±1.24	67.41±0.83	70.57±2.36
粗脂肪 EE	17.16±1.82[b]	16.73±0.71[b]	17.52±1.40[b]	21.34±0.83[a]	20.50±0.39[a]	16.27±0.69[b]
粗灰分 Ash	20.93±1.06	19.01±2.16	19.75±0.73	20.76±0.56	20.22±1.20	21.61±0.95

2.3　饲料 n-3HUFA 水平对多鳞鱚血清生化指标的影响

由表 5 可见，饲料 HUFA 水平在 0.53%~1.62%之间时，血清 HDL-C 含量显著上升（$P<0.05$），2.56%组血清 HDL-C 含量显著高于除 2.12%组外的其他各组（$P<0.05$）。血清 LDL-C 含量则是先上升后逐渐下降，在 0.80%组达到最大值并显著高于其他各组（$P<0.05$）。血清 ALT、AST 活性呈现出先下降后上升再下降的趋势，血清 ALT 活性在 1.22%组达到最低值并显著低于其他各组（$P<0.05$），血清 AST 活性则在 0.80%组达到最低值并显著低于其他各组（$P<0.05$）。随着饲料 n-3HUFA 水平的增加，血清 T-CHOL 含量呈先上升后下降并稳定的趋势，血清 TG 含量呈先上升后下降的趋势；0.53%组的血清 T-CHOL、TG 含量显著低于其他各组（$P<0.05$），0.80%组的血清 T-CHOL、TG 含量显著高于其他各组（$P<0.05$）。

表 5　饲料 n-3HUFA 水平对多鳞鱚血清生化指标的影响

Table 5　Effects of dietary n-3HUFA level on serum biological parameters of *Sillago sihama*

项目 Items	n-3HUFA 水平 n-3HUFA level/%					
	0.53	0.80	1.22	1.62	2.12	2.56

高密度脂蛋白胆固醇 HDL-C/（mmol/L）	2.10±0.05^{e}	2.33±0.08^{d}	2.59±0.05^{c}	2.76±0.06^{b}	2.80±0.02^{ab}	2.91±0.0 5^{a}
低密度脂蛋白胆固醇 LDL-C/（mmol/L）	1.76±0.08^{d}	4.25±0.13^{a}	3.35±0.18^{b}	3.30±0.06^{b}	3.24±0.08^{b}	2.87±0.06^{c}
谷丙转氨酶 ALT/（U/L）	61.54±0.85^{a}	47.04±1.12^{c}	34.93±0.91^{e}	41.98±0.86^{d}	49.94±0.21^{b}	47.08±1.15^{c}
谷草转氨酶 AST/（U/L）	228.05±3.61^{a}	148.60±3.08^{d}	187.06±0.40^{c}	191.26±0.51^{c}	204.20±1.14^{b}	188.67±2.89^{c}
总胆固醇 T-CHOL/（mmol/L）	4.83±0.21^{c}	7.96±0.09^{a}	6.58±0.36^{b}	6.67±0.11^{b}	6.98±0.05^{b}	6.92±0.06^{b}
甘油三酯 TG/（mmol/L）	3.75±0.13^{e}	8.55±0.26^{a}	6.90±0.02^{c}	7.06±0.08^{bc}	7.30±0.13^{b}	6.28±0.05^{d}

2.4　饲料 n-3HUFA 水平对多鳞鱚肝脏酶活性的影响

由表 6 可见，各组之间的血清 SOD 和 ACP 活性没有显著差异（P>0.05）。2.12%组和 2.56%组之间的血清 AKP 活性无显著差异（P>0.05），但显著低于除 1.62%组外的其他各组（P<0.05）。1.62%组的血清 CAT 活性最低，与 1.22%组和 2.12%组无显著差异（P>0.05），但显著低于其他各组（P<0.05）。

表 6　饲料 n-3HUFA 水平对多鳞鱚肝脏酶活性的影响

Table 6　Effects of dietary n-3HUFA level on liver enzyme activities of *Sillago sihama*

项目 Items	n-3HUFA 水平 n-3HUFA level/%					
	0.53	0.80	1.22	1.62	2.12	2.56
超氧化物歧化酶 SOD/（U/mg prot）	2.70±0.51	3.08±0.38	2.83±0.49	3.13±0.05	2.56±0.11	2.40±0.18
酸性磷酸酶 ACP/（金氏单位/g prot）	18.82±2.32	20.39±1.52	22.01±4.90	18.90±2.49	17.81±2.83	18.68±2.26
碱性磷酸酶 AKP/（金氏单位/g prot）	38.72±6.99^{ab}	39.87±4.62^{ab}	43.51±4.14^{a}	30.01±0.10^{bc}	21.43±3.13^{c}	23.70±4.13^{c}

过氧化氢酶 CAT/(U/mg prot)	22.06±1.87^{b}	37.06±1.99^{a}	16.15±5.80^{bc}	7.01±0.84^{c}	14.76±1.45^{bc}	23.72±9.19^{b}

2.5 饲料 n-3HUFA 水平对多鳞鱚肝脏、肌肉脂肪酸组成的影响

由表 7 可见，多鳞鱚肝脏中的主要脂肪酸为 C16:0 和 C18:1n-9，含量均超过了 20%。随着饲料 n-3HUFA 水平的提高，肝脏 C18:3n-3、C20:5n-3、C22:6n-3 含量显著升高（P<0.05），肝脏 C18:2n-6 含量显著降低（P<0.05），肝脏 C18:1n-9 含量呈降低趋势；肝脏 C18:0 含量呈先升高后稳定的趋势，在 2.12%组达到最高值。

表 7　饲料 n-3HUFA 水平对多鳞鱚肝脏脂肪酸组成的影响（%总脂肪酸）

Table 7　Effects of dietary n-3HUFA level on liver fatty acid composition of *Sillago sihama*　（%TFA）

脂肪酸	n-3HUFA 水平 n-3HUFA level/%					
Fatty acids	0.53	0.80	1.22	1.62	2.12	2.56
C14:0	2.90±0.04	2.90±0.01	2.89±0.01	2.90±0.03	2.90±0.00	2.92±0.01
C16:0	23.88±0.19	23.72±0.07	23.78±0.13	23.86±0.09	23.88±0.09	23.85±0.06
C16:1n-9	8.86±0.12	8.52±0.04	8.75±0.08	8.83±0.07	8.83±0.16	8.67±0.30
C18:0	7.32±0.13^{b}	7.31±0.04^{b}	7.44±0.08^{ab}	7.40±0.06^{ab}	7.55±0.11^{a}	7.46±0.07^{ab}
C18:1n-9	30.92±0.06^{a}	27.49±0.54^{b}	25.84±0.71^{c}	24.93±0.34^{c}	22.63±1.01^{d}	22.13±0.36^{d}
C18:2n-6	11.65±0.07^{a}	10.71±0.06^{b}	9.93±0.06^{c}	9.18±0.09^{d}	8.20±0.06^{e}	7.49±0.11^{f}
C18:3n-3	1.25±0.06^{f}	1.43±0.03^{e}	1.54±0.03^{d}	1.66±0.03^{c}	1.77±0.02^{b}	1.86±0.03^{a}
C20:0	0.45±0.06	0.43±0.03	0.46±0.02	0.44±0.03	0.47±0.01	0.45±0.03
C20:1n-6	0.70±0.02	0.73±0.01	0.71±0.01	0.69±0.02	0.73±0.03	0.74±0.03
C20:2n-6	0.68±0.04^{a}	0.65±0.04^{ab}	0.61±0.01^{bc}	0.58±0.01^{bc}	0.58±0.01^{c}	0.61±0.02^{bc}
C20:3n-6	0.42±0.04	0.44±0.03	0.39±0.01	0.43±0.02	0.44±0.01	0.42±0.02
C20:4n-6	0.88±0.04^{e}	1.13±0.06^{d}	1.82±0.04^{c}	2.32±0.04^{b}	2.79±0.13^{a}	2.41±0.04^{b}
C22:0	0.14±0.01	0.14±0.01	0.15±0.01	0.13±0.01	0.15±0.01	0.14±0.01

C22:1n-9	0.13±0.01	0.14±0.01	0.12±0.01	0.12±0.01	0.13±0.02	0.13±0.01
C20:5n-3	1.25±0.06[f]	1.43±0.03[e]	1.54±0.03[d]	1.66±0.03[c]	1.77±0.02[b]	1.86±0.03[a]
C22:6n-3	3.92±0.09[f]	5.91±0.04[e]	6.80±0.06[d]	8.52±0.06[c]	9.92±0.06[b]	10.94±0.25[a]

由表 8 可见，随着饲料 n-3HUFA 水平的提高，肌肉 C18:2n-6、C20:4n-6 含量呈降低趋势，2.12%组和 2.56 组显著低于其他各组（P<0.05）；肌肉 C20:5n-3、C22:6n-3 含量呈升高趋势，2.56%组显著高于其他各组（P<0.05）；肌肉 C16:0 含量呈先升高后稳定趋势，在 1.22%组达到最高。肌肉 C16:1n-9 含量在 1.62%组达到最高。

表 8　饲料 n-3HUFA 水平对多鳞鱚肌肉脂肪酸组成的影响（%总脂肪酸）

Table 8　Effects of dietary n-3HUFA level on muscle fatty acid composition of *Sillago sihama*　（%TFA）

脂肪酸	n-3HUFA 水平 n-3HUFA level/%					
Fatty acids	0.53	0.8	1.22	1.62	2.12	2.56
C14:0	3.41±0.02	3.25±0.13	3.32±0.10	3.44±0.08	3.48±0.09	3.30±0.11
C16:0	24.92±0.05[ab]	24.39±0.40[b]	25.25±0.17[a]	24.60±0.38[ab]	25.00±0.16[ab]	24.75±0.23[ab]
C16:1n-9	4.3±0.14[ab]	4.01±0.18[b]	4.22±0.11[ab]	4.43±0.08[a]	4.28±0.13[ab]	4.15±0.11[ab]
C18:0	11.10±0.08	10.81±0.33	10.98±0.19	10.88±0.13	11.03±0.08	10.99±0.21
C18:1n-9	14.69±0.04	14.50±0.25	14.65±0.13	14.39±0.19	14.56±0.16	14.60±0.12
C18:2n-6	8.85±0.07[a]	9.00±0.14[a]	8.20±0.14[b]	7.25±0.21[c]	6.60±0.14[d]	5.10±0.28[e]
C18:3n-3	0.85±0.07	0.95±0.21	1.05±0.21	1.20±0.14	1.10±0.14	1.15±0.07
C20:0	0.54±0.02	0.53±0.02	0.54±0.01	0.53±0.01	0.556±0.02	0.55±0.03
C20:1n-6	0.57±0.01	0.56±0.01	0.56±0.01	0.57±0.01	0.57±0.01	0.56±0.01
C20:2n-6	0.36±0.01	0.37±0.01	0.35±0.01	0.36±0.02	0.37±0.02	0.37±0.01
C20:3n-6	0.46±0.02	0.45±0.02	0.45±0.01	0.46±0.01	0.47±0.01	0.47±0.02
C20:4n-6	4.42±0.07[a]	3.76±0.16[b]	3.13±0.06[c]	2.43±0.06[cd]	1.83±0.08[f]	2.10±0.06[e]

C22:0	0.26±0.01	0.27±0.01	0.27±0.02	0.25±0.01	0.26±0.02	0.26±0.01
C20:5n-3	7.81±0.09[d]	8.51±0.09[c]	8.75±0.19[c]	9.28±0.05[b]	9.52±0.10[b]	9.95±0.09[a]
C22:6n-3	12.52±0.04[d]	14.14±0.94[c]	14.35±1.08[c]	15.86±0.26[b]	16.93±0.08[b]	18.42±0.07[a]

3 讨 论

3.1 饲料 n-3HUFA 水平对多鳞鱚生长性能和形态学指标的影响

已有研究表明，适宜水平的 n-3HUFA 可促进海水鱼生长，提高饲料利用率[13]。各动物之间适宜 n-3HUFA 水平差异较大。饲料 n-3HUFA 水平为 0.85%时，黑鲷（*Sparus macrocephalus*）幼鱼有最高的 WGR[14]。[15]报道，饲料 n-3HUFA 水平为 0.75%时能显著提高细鳞鲑（*Brachymystax lenok*）的 WGR、SGR。Kim 等[16]建议牙鲆（*Paralichthys olivaceus*）饲料 n-3HUFA 水平应在 0.8%~1.0%。饲料 n-3HUFA 水平为 0.98%时可显著提高大黄鱼（*Larmichthys crocea*）的生长性能[17]。饲料 n-3HUFA 水平为 1%时可使金头鲷（*Sparus aurata*）幼鱼有最佳的生长性能和饲料效率[18]。饲料 n-3HUFA 水平分别为 2.53%和 3.93%时，斜带石斑鱼（*Epinephluscoioides*）幼鱼和中鱼有最高 SGR[19]。本试验结果表明，饲料 n-3HUFA 水平显著影响多鳞鱚的 WGR、SGR 和 FCR，且随着饲料 n-3HUFA 水平的增加呈现出先上升后稳定的趋势，折线模型拟合得出，饲料 n-3HUFA 水平为 2.21%时，多鳞鱚有最大的 WGR。

黄斑蓝子鱼（*Siganus canaliculatus*）[20]、俄罗斯鲟（*Acipenser gueldenstaedti*）幼鱼[21]的研究中发现，不同的饲料 n-3HUFA 水平对黄斑篮子鱼 WGR、SGR 和 FCR 均无显著影响，且随着饲料 n-3HUFA 水平的增加，HSI 呈现出先上升后下降的趋势。试验结果的不同可能与试验鱼的食性差异有关，植性食物亚油酸含量较亚麻酸丰富，从而使得植食性鱼类形成对饲料中亚油酸的需求，黄斑蓝子鱼作为植食性鱼类，n-3HUFA 的变化对其生长性能等的影响较小或无影响。试验鱼种也影响试验结果，部分鱼类如大西洋鲑（*Salmo salar*）[22]可以将 18：2n-6 合成 EPA、DHA，且合成能力受环境等因素影响。在本次试验中，随着饲料 n-3HUFA 水平的增加，多鳞鱚 HSI 呈现出先下降后上升的趋势，这与在金头鲷[18]、斜带石斑鱼幼鱼[23]中的研究结果相同，然而在黄斑篮子鱼[20]的研究中得出相反的趋势。在养殖过程中，饲料中的营养素的缺失或过量都可造成养殖对象的形态变化[18]。斜带石斑鱼的研究结果表明，n-3HUFA 可阻止肝脏星状细

胞产生，降低 HSI[19]。本次试验结果与之类似，这表明饲料中的 n-3HUFA 可促进脂类分解，减少机体尤其是肝脏中的脂肪沉积[24-25]。CF 是衡量鱼类形体的一个重要指标，多鳞鱚的 CF 随着饲料 n-3HUFA 水平的增加而呈现出先上升后下降的趋势，表明饲料中一定的 n-3HUFA 水平有利于多鳞鱚的形态发育。试验结果与在斜带石斑鱼幼鱼[19]研究结果相同。而在斜带石斑鱼[23]、军曹鱼（*Rachycentron canadum* L.）[26]、草鱼（*Ctenopharyngodon idella*）稚鱼[27]的研究中，饲料 n-3HUFA 水平对试验对象 CF 没有显著影响。

3.2　饲料 n-3HUFA 水平对多鳞鱚体成分的影响

本试验中，饲料 n-3HUFA 水平对多鳞鱚水分、粗蛋白质和粗灰分含量没有显著影响，这与在军曹鱼[28]、细鳞鲑[15]的研究结果相似。随着饲料 n-3HUFA 水平的增加，多鳞鱚体脂肪呈现出先上升后下降的趋势，这与在军曹鱼[26]、牙鲆[29]、草鱼稚鱼[27]等研究中的结果相似，原因可能是饲料中 n-3HUFA 在满足自身代谢所需后，多出的 n-3HUFA 在体内沉积。当满足体脂沉积后，可诱导线粒体中的解偶联蛋白（UCP），加强线粒体中的β-氧化，降低体脂的沉积量[2,30]。在斜带石斑鱼[19]、黑鲷[31]、凡纳滨对虾（*Litopenaeus vannamei*）中虾[32]中则得到了相反的结果，即饲料 n-3HUFA 水平的增加使得体脂含量呈现先下降后上升的趋势。在大菱鲆[33]、黄斑蓝子鱼[20]、真鲷（*Pagrus major*）[34]的研究中，饲料 n-3HUFA 水平对鱼体的粗脂肪含量没有显著影响。这说明饲料 n-3HUFA 水平对鱼体成分的影响因鱼种而不同。

3.3　饲料 n-3HUFA 水平对多鳞鱚血清生化指标的影响

血清生化指标可作为衡量机体健康状况的指标，通过对血液的检测可了解机体的营养、代谢与疾病等情况。刘玉军等[35]研究发现，DHA 可有效降低高脂血患者血清 T-CHOL 和 TG 含量。EPA 和 DHA 可显著降低蛋鸡血清 T-CHOL 含量[36]。EPA 和 DHA 可抑制机体 T-CHOL 和 TG 合成，降低其在人类血清中的含量[37]。EPA 和 DHA 可改善血液循环，降低能诱发动脉硬化和血栓的低密度脂蛋白的含量[38]。本试验中，多鳞鱚血清 HDL-C 含量逐渐上升，血清 T-CHOL 含量先上升后下降，结果与俄罗斯鲟幼鱼[21]的结果相似。血清 ALT、AST 活性呈现出先下降后上升的趋势，可能是饲料 n-3HUFA 水平增加后加重了肝脏脂肪代谢的负担，导致细胞通透性降低，使得 ALT、AST 进入血液[26]；HDL-C 有保护心血管、促进胆固醇逆向转运等功能[39]，LDL-C 则是向组织转运肝脏合成的内源性胆固醇的主要形式[40]。随着饲料 n-3HUFA 水平增

加，多鳞鱚血清中的 LDL-C 含量短暂上升后则是持续的下降，这与凡纳滨对虾[32]研究中的结果相似，表明了 n-3HUFA 有利于体内的脂肪代谢。

3.4 饲料 n-3HUFA 水平对多鳞鱚肝脏酶活性的影响

在机体内，SOD、CAT 与过氧化物酶 POD 组成体内活性氧防御系统，能有效地清除体内超氧自由基、过氧化氢及其他过氧化物[41]。CAT 在机体内参与活性氧代谢过程，可催化细胞内过氧化氢的分解，维持自由基代谢平衡，防止过氧化对机体造成损伤[42]。AKP 作为一种非特异性磷酸单酯酶，可催化所有磷酸单酯的水解并生成磷酸根离子和自由羟基[43]，当存在于肝脏中时可参与肝细胞的排泄功能[44]。在本试验中，饲料 n-3HUFA 水平不影响肝脏 SOD 和 ACP 活性。但饲料 n-3HUFA 水平由 0.80%增加到 1.62%时，多鳞鱚肝脏中 CAT 活性逐渐降低，饲料 n-3HUFA 水平由 1.62%增加到 2.56%时，肝脏 CAT 活性逐渐上升，结果与斜带石斑鱼[19]研究结果相似。这说明低于 1.62%的饲料 n-3HUFA 水平对多鳞鱚体内活性氧代谢、超氧自由基的平衡产生有利的作用，当饲料 n-3HUFA 水平高于 1.62%后，肝脏 CAT 活性上升以清除肝脏中高水平 n-3HUFA 过氧化产生的自由基。而在褐菖鲉（*Sebastiscus marmoratus*）[45]的研究中则显示饲料 n-3HUFA 水平不影响肝脏 CAT 活性。

3.5 饲料 n-3HUFA 水平对多鳞鱚肝脏、肌肉脂肪酸含量的影响

饲料 n-3HUFA 水平可显著影响试验对象组织中脂肪酸含量[46-50]，组织脂肪酸的组成能一定程度上反映饲料脂肪酸组成[51]。本试验中，随着饲料 n-3HUFA 水平的增加，多鳞鱚肝脏中 n-3HUFA 含量呈现上升趋势，表现出与饲料 n-3HUFA 一致的规律，这与凡纳滨对虾[32]、黑鲷幼鱼[52]、真鲷[34]等的研究结果类似。在海水鱼组织中，可根据 C18:1n-9 的含量来判断出必需脂肪酸的缺乏[19]。在本试验中可看出，随着饲料 n-3HUFA 水平的提高，肝脏中的 C18:1n-9 含量明显降低，由此可知饲料中添加 n-3HUFA 可逐步满足多鳞鱚对必需脂肪酸的需要。对比多鳞鱚肝脏和肌肉之间脂肪酸的变化，可看出饲料 n-3HUFA 水平对肝脏脂肪酸组成的影响比肌肉脂肪酸组成更明显，与牙鲆[8]的研究结果相似。研究指出，动物组织根据 n-9、n-6、n-3 的优先顺序，通过脂肪酸β氧化为机体提供 ATP[53]。本试验中，多鳞鱚肝脏 C18:1n-9 含量显著降低，表明多鳞鱚可利用单不饱和脂肪酸进行能量代谢而消耗，在斜带石斑鱼[19]和真鲷[54]研究中也有类似报道。

多鳞鱚肌肉 EPA、DHA 含量均较饲料中高，表明动物可在体内选择性保留 EPA 和 DHA，在凡纳滨对虾[55]、斑节对虾[56]研究中也有类似报道。在研究中通常会根据 n-3/n-6 来评定脂肪酸营养，n-3/n-6 越高代表营养价值越高[57]。脂质可影响肌肉的风味口感，HUFA 受热可降解生成独特香味的醛酮等物质[58]，证明饲料 n-3HUFA 水平可提升多鳞鱚鱼肉品质。

4 结 论

本试验条件下，各测定指标表明饲料中添加 1.62%~2.12%的 n-3HUFA 能促进多鳞鱚生长性能和维持机体内环境的稳定。以 WGR 为依据，折线模型得出多鳞鱚幼鱼对饲料中 n-3HUFA 的需要量为 2.21%。

参考文献：

[1] 杜涛,黄洋,曹剑香.多鳞鱚采捕暂养的初步研究[J].养殖与饲料,2009(10):15–17.

[2] 张晓图,杜晨红,丁小娟,等.多不饱和脂肪酸的生物学功能及其在动物生产中的应用[J].动物营养学报,2017,29(9):3059–3067.

[3] 弓剑,晓敏.多不饱和脂肪酸代谢及其对炎症的调节[J].动物营养学报,2017,29(1):1–7.

[4] 许友卿,李伟峰,丁兆坤.多不饱和脂肪酸对鱼类免疫与成活的影响及机理[J].动物营养学报,2010,22(3):551–556.

[5] BELL J G,TOCHER D R,FARNDALE B M,et al.Effects of essential fatty acid-deficient diets on growth,mortality,tissue histopathology and fatty acid compositions in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*)[J].Fish Physiology and Biochemistry,1999,20(3):263–277.

[6] 王裕玉,杨雨虹.水生生物对高不饱和脂肪酸的营养需求[J].中国饲料,2008(18):31–33.

[7] JIN M,LU Y,YUAN Y,et al.Regulation of growth,antioxidant capacity,fatty acid profiles,hematological characteristics and expression of lipid related genes by different dietary n-3 highly unsaturated fatty acids in juvenile black seabream (*Acanthopagrus schlegelii*)[J].Aquaculture,2017,471:55–65.

[8] 薛敏,李爱杰,张显娟.牙鲆幼鱼对 EPA 和 DHA 的营养需求[J].水产学报,2004,28(3):285–291.

[9] 许友卿,庄丽,丁兆坤.多不饱和脂肪酸对海水仔稚鱼生长发育的影响及机理[J].饲料工业,2010,31(14):13–18.

[10] 刘镜恪,陈晓琳.海水仔稚鱼的必需脂肪酸—n-3 系列高度不饱和脂肪酸研究概况[J].中国海洋大学学报（自然科学版）,2002,32(6):897–902.

[11] 黄洋,杜涛,黄海立.多鳞鱚 *Sillago sihama* Forskál 人工繁殖研究[J].广东海洋大学学报,2013,33(1):15–21.

[12] HORWITZ W,SENZEL A J,REYNOLDS H,et al.Official methods of analysis of de association of official analytical chemists[J].Journal of Pharmaceutical Sciences,1997,60(4):465.

[13] 王秀英,邵庆均,黄磊.饵料中高不饱和脂肪酸对海水鱼苗养殖的影响[J].中国饲料,2004(20):29–31.

[14] 马晶晶,邵庆均,许梓荣,等.n-3 高不饱和脂肪酸对黑鲷幼鱼生长及脂肪代谢的影响[J].水产学报,2009,33(4):639–649.

[15] 常杰,牛化欣,胡宗福,等.细鳞鲑幼鱼 n-3 HUFA 需求量的研究[J].淡水渔业,2017,47(6):81–87.

[16] KIM K D,LEE S M.Requirement of dietary n-3 highly unsaturated fatty acids for juvenile flounder (*Paralichthys olivaceus*)[J].Aquaculture,2004,229(1/2/3/4):315–323.

[17] ZUO R T,AI Q H,MAI K S,et al.Effects of dietary n-3 highly unsaturated fatty acids on growth,nonspecific immunity,expression of some immune related genes and disease resistance of large yellow croaker (*Larmichthys crocea*) following natural infestation of parasites (*Cryptocaryon irritans*)[J].Fish & Shellfish Immunology,2012,32(2):249–258.

[18] IBEAS C,CEJAS J,GÓMEZ T,et al.Influence of dietary *n*-3 highly unsaturated fatty acids levels on juvenile gilthead seabream (*Sparus aurata*) growth and tissue fatty acid composition[J].Aquaculture,1996,142(3/4):221–235.

[19] 何流健.两种规格斜带石斑鱼 n-3 高度不饱和脂肪酸和卵磷脂需要量的研究[D].硕士学位论文.湛江:广东海洋大学,2013.

[20] 刘雪兵.黄斑蓝子鱼对多不饱和脂肪酸的需求特性研究[D].硕士学位论文.汕头:汕头大学,2011.

[21] 李琦.俄罗斯鲟幼鱼(*Acipenser gueldenstaedti*)的脂肪酸需要量和适宜脂肪源研究[D].博士学位论文.上海:华

东师范大学,2017.

[22] ZHENG X Z,TOCHER D R,DICKSON C A,et al.Effects of diets containing vegetable oil on expression of genes involved in highly unsaturated fatty acid biosynthesis in liver of Atlantic salmon (*Salmo salar*)[J].Aquaculture,2004,236(1/2/3/4):467–483.

[23] 朱庆国,林建斌,黄种持,等.饲料中不同水平 n-3 HUFA 对斜带石斑鱼幼鱼生长及肌肉脂肪酸组成的影响[J].广东海洋大学学报,2012,32(4):20–27.

[24] GLENCROSS B D.Exploring the nutritional demand for essential fatty acids by aquaculture species[J].Reviews in Aquaculture,2009,1(2):71–124.

[25] THOMASSEN M S,REIN D,BERGE G M,et al.High dietary EPA does not inhibit Δ5 and Δ6 desaturases in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fed rapeseed oil diets[J].Aquaculture,2012,360–361:78–85.

[26] 史俊.三个生长阶段军曹鱼对卵磷脂和 n-3HUFA 需要量的研究[D].硕士学位论文.湛江:广东海洋大学,2013.

[27] 李杰.高不饱和脂肪酸对草鱼稚鱼生长、脂质代谢的影响及其分子机理的研究[D].硕士学位论文.杨凌:西北农林科技大学,2011.

[28] 刘兴旺,谭北平,麦康森,等.饲料中不同水平 n-3 HUFA 对军曹鱼生长及脂肪酸组成的影响[J].水生生物学报,2007,31(2):190–195.

[29] LEE S M,LEE J H,KIM K D.Effect of dietary essential fatty acids on growth,body composition and blood chemistry of juvenile starry flounder (*Platichthys stellatus*)[J].Aquaculture,2003,225(1/2/3/4):269–281.

[30] TAKADA R,SAITOH M,MORI T.Dietary γ-linolenic acid-enriched oil reduces body fat content and induces liver enzyme activities relating to fatty acid β-oxidation in rats[J].The Journal of Nutrition,1994,124(4):469–474.

[31] OM A D,UMINO T,NAKAGAWA H,et al.The effects of dietary EPA and DHA fortification on lipolysis activity and physiological function in juvenile black sea bream *Acanthopagrus schlegeli* (Bleeker)[J].Aquaculture Research,2015,32(1):255–262.

[32] 王凤美.不同生长阶段凡纳滨对虾对卵磷脂、胆固醇和 n-3HUFA 需要量的研究[D].硕士学位论文.湛江:广东

海洋大学,2013.

[33] 彭墨,徐玮,麦康森,等.亚麻籽油替代鱼油对大菱鲆幼鱼生长、脂肪酸组成及脂肪沉积的影响[J].水产学报,2014,38(8):1131–1139.

[34] HUANG S S Y,OO A N,HIGGS D A,et al.Effect of dietary canola oil level on the growth performance and fatty acid composition of juvenile red sea bream,*Pagrus major*[J].Aquaculture,2007,271(1/2/3/4):420–431.

[35] 刘玉军,孙明堂,黄元伟,等.浓缩鱼油对高脂血患者血脂和血小板聚集及体外血栓形成的影响[J].营养学报,1992,14(1):17–22.

[36] 汪鲲.n-3 多不饱和脂肪酸在蛋黄和组织中的富集规律及其对产蛋鸡脂类代谢的影响[D].博士学位论文.北京:中国农业科学院,2000.

[37] DYERBERG J,BANG H O,STOFFERSEN E,et al.Eicosapentaenoic acid and prevention of thrombosis and atherosclerosis?[J].Lancet,1978,312(8081):117–119.

[38] 陈秀丽.不同来源 n-3 PUFA 在蛋鸡中应用效果的评价[D].硕士学位论文.杨凌:西北农林科技大学,2014.

[39] 福利,林泽邦,欧志君,等.高密度脂蛋白功能研究进展[J].中国循环杂志,2015,30(9):919–921.

[40] 王爱民.饲料脂肪水平对吉富罗非鱼生长及脂肪代谢调节的研究[D].博士学位论文.南京:南京农业大学,2011.

[41] 刘冰,梁婵娟.生物过氧化氢酶研究进展[J].中国农学通报,2005,21(5):223–224,232.

[42] 张坤生,田荟琳.过氧化氢酶的功能及研究[J].食品科技,2007,32(1):8–11.

[43] 许明珠,张琴,童潼,等.饲料锌含量对方格星虫稚虫生长性能、体成分、体腔液中锌含量及碱性磷酸酶活性的影响[J].动物营养学报,2016,28(7):2292–2299.

[44] 王石莹,闫素梅.碱性磷酸酶在动物骨骼代谢中的研究进展[J].饲料博览,2009(4):14–17.

[45] 岳彦峰,彭士明,施兆鸿,等.饲料 n-3HUFA 水平对褐菖鲉血清生化指标、主要脂代谢酶活力及抗氧化能力的影响[J].海洋渔业,2013,35(4):460–467.

[46] SARGENT J R,MCEVOY L A,BELL J G.Requirements,presentation and sources of polyunsaturated fatty acids

in marine fish larval feeds[J].Aquaculture,1997,155(1/2/3/4):117–127.

[47] FOUNTOULAKI E,ALEXIS M N,NENGAS I,et al.Effects of dietary arachidonic acid (20:4*n*-6),on growth,body composition,and tissue fatty acid profile of gilthead bream fingerlings (*Sparus aurata* L.)[J].Aquaculture,2003,225(1/2/3/4):309–323.

[48] SUI L Y,WILLE M,CHENG Y X,et al.The effect of dietary n-3 HUFA levels and DHA/EPA ratios on growth,survival and osmotic stress tolerance of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* larvae[J].Aquaculture,2007,273(1):139–150.

[49] COPEMAN L A,PARRISH C C,BROWN J A,et al.Effects of docosahexaenoic,eicosapentaenoic,and arachidonic acids on the early growth,survival,lipid composition and pigmentation of yellowtail flounder (*Limanda ferruginea*):a live food enrichment experiment[J].Aquaculture,2002,210(1/2/3/4):285–304.

[50] REZEK T C,WATANABE W O,HAREL M,et al.Effects of dietary docosahexaenoic acid (22:6n-3) and arachidonic acid (20:4n-6) on the growth,survival,stress resistance and fatty acid composition in black sea bass *Centropristis striata* (Linnaeus 1758) larvae[J].Aquaculture Research,2010,41(9):1302–1314.

[51] IBEAS C,RODRÍGUEZ C,BADÍA P,et al.Efficacy of dietary methyl esters of *n*-3 HUFA vs. triacylglycerols of *n*-3 HUFA by gilthead seabream (*Sparus aurata* L.) juveniles[J].Aquaculture,2000,190(3/4):273–287.

[52] MOZANZADEH M T,MARAMMAZI J G,YAVARI V,et al.Dietary n-3 LC-PUFA requirements in silvery-black porgy juveniles (*Sparidentex hasta*)[J].Aquaculture,2015,448:151–161.

[53] HALVER J E.Fish nutrition[M].2nd ed.San Diego:Academic Press,1989.

[54] TAKEUCHI T,TOYOTA M,WATANABE T.Dietary value of *Artemia* enriched with various types of oil for larval striped knifejaw and red sea bream[J].Nippon Suisan Gakkaishi,1992,58(2):283–289.

[55] GONZÁLEZ-FÉLIX M L,LAWRENCE A L,GATLIN Ⅲ D,et al.Growth,survival and fatty acid composition of juvenile *Litopenaeus vannamei* fed different oils in the presence and absence of phospholipids[J].Aquaculture,2002,205(3/4):325–343.

[56] DEERING M J,FIELDER D R,HEWITT D R.Growth and fatty acid composition of juvenile leader prawns,*Penaeus monodon*,fed different lipids[J].Aquaculture,1997,151(1/2/3/4):131–141.

[57] 郑海波.中华绒螯蟹的品质分析与比较[D].硕士学位论文.无锡:江南大学,2008.

[58] 薛长湖,汪贻生,林洪,等.虾蟹海产品香味的前体物质的加热变化[J].中国海洋大学学报（自然科学版）,1994,24(4):491–496.

Requirement of Dietary n-3 Highly Unsaturated Fatty Acids of *Sillago sihama*

HE Haolun[1,2] DONG Xiaohui[1,2*] TAN Beiping[1,2] YANG Qihui[1,2] CHI Shuyan[1,2] LIU Hongyu[1,2]

ZHANG Shuang[1,2] YANG Yuanzhi[1,2] ZHANG Haitao[2]

(1. *Laboratory of Aquatic Animal Nutrition and Feed, College of Fisheries, Guangdong Ocean University, Zhanjiang* 524088, *China;* 2. *Key Laboratory of Aquatic, Livestock and Poultry Feed Science and Technology in South China, Ministry of Agriculture, Zhanjiang* 524000, *China*)

Abstract**:** This experiment was conducted to study the requirement of dietary n-3 highly unsaturated fatty acids (n-3HUFA) of *Sillago sihama.* A total of 540 juvenile *Sillago sihama* with average body weight of (6.0±0.6) g were randomly divided into 6 groups with 3 replicates per group and 30 fish per replicate. Fish in the six groups were fed the isonitrogenic and isolipidic diets for 8 weeks, and the dietary n-3HUFA levels were 0.53%, 0.80%, 1.22%, 1.62%, 2.12% and 2.56%, respectively. The results showed as follows: 1) the weight gain rate and specific growth rate of 2.12% group were the highest and significantly higher than those of 0.53% group (P<0.05); the feed conversion rate of 2.12% group was the lowest and significantly lower than that of 0.53% group (P<0.05); the hepatosomatic index of 2.12% group was the lowest and significantly lower than that of 0.53% and 0.80% groups (P<0.05); the condition factor of 2.12% group was the highest and significantly higher than that of other groups except 1.62% group (P<0.05). 2) There were no significant differences on the contents of moisture, crude protein and crude ash of whole body among all group (P>0.05); the whole body ether extract content of 1.62% group was the highest and significantly higher than that of other groups except 1.62% group (P<0.05). 3) The serum high density lipoprotein cholesterol (HDL-C) content of 2.56% was significantly higher than that of other groups except 2.12% group (P<0.05), the serum low density lipoprotein cholesterol (LDL-C) content of 0.80% was significantly higher than that of other groups (P<0.05), the serum alanine aminotransferase (ALT) activity of 1.22% was significantly lower than that of other groups (P<0.05), the serum aspartate aminotransferase (AST)

*Corresponding author,professor,E-mail: dongxiaohui2003@163.com (责任编辑　武海龙)

activity of 0.80% was significantly lower than that of other groups ($P<0.05$); the contents of total cholesterol (T-CHOL) and triglyceride (TG) in serum of 0.53% were significantly lower than those of other groups ($P<0.05$), and the contents of T-CHOL and TG in serum of 0.80% were significantly higher than those of other groups ($P<0.05$). 4) There were no significant differences on the activities of superoxide dismutase (SOD) and acid phosphatase (ACP) in serum among all group ($P>0.05$), the serum alkaline phosphatase (AKP) activity of 2.12% and 2.56% groups was significantly lower than that of other groups except 1.62% group ($P<0.05$), the serum catalase (CAT) activity of 1.62% groups was significantly lower than that of other groups except 1.22% and 1.12% groups ($P<0.05$). 5) With dietary n-3HUFA level increased, the contents of C18:3n-3, C20:5n-3 and C22:6n-3 in liver were significantly increased ($P<0.05$), and the liver C18:2n-6 content was significantly decreased ($P<0.05$). 6) With dietary n-3HUFA level increased, the contents of C18:2n-6 and C20:4n-6 in muscle were showed a decreasing trend, and those of 2.12% and 2.56% group were significantly lower than those of other groups ($P<0.05$); the contents of C20:5n-3 and C22:6n-3 in muscle were showed a increasing trend, and those of 2.56% group were significantly higher than those of other groups ($P<0.05$). In conclusion, based on the weight gain rate, the requirement of n-3HUFA level in diet for juvenile *Sillago sihama* determined by broken-line model is 2.21%.

Key words: *Sillago sihama*; n-3 highly unsaturated fatty acid; growth performance; serum biological parameters; tissue fatty acid contents